

Automatisiertes Ablegen eines Blitzschutzprepregs mit einem Roboterendeffektor

M. Malecha, C. Schmidt-Eisenlohr, P. Kaufmann, T. Gerngross
DLR e.V., Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

Zusammenfassung

Mit dem steigenden Anteil von CFK-Bauteilen am Gesamtvolumen der Komponenten eines modernen Passagierflugzeugs rücken automatisierte Produktionsprozesse in den Fokus der Fertigungsplanung. Diese beinhalten oftmals Lösungen, die eine Übertragung der bisher manuell durchgeführten Fertigungsschritte an eine Roboterzelle zum Ziel haben, und Vorteile bezüglich der Fertigungsqualität, der Taktung und der Wirtschaftlichkeit gegenüber der bisherigen, manuellen Prozesse, aufweisen. Ein gutes Beispiel für einen solchen Fertigungsschritt ist das Ablegen des Blitzschutzprepregs auf der Außenhülle des A350.

Wir stellen die Entwicklung eines Roboterendeffektors für eine automatisierte Ablage des Blitzschutzmaterials auf der Rumpfaußenhaut dar. Die beschriebenen Entwicklungsstufen reichen von der Präzisierung der gestellten Anforderungen sowie den ersten Voruntersuchungen am Material bis hin zu Planung der Validierungsversuche. Eine Zwischenstufe bilden die Tests zur Überprüfung der Konzepte sowie Abschätzung der Parameter an einem bewegten Ablegewagen. Anhand der Ergebnisse und Erfahrungen aus den Experimenten mit dem Versuchswagen, wurde ein kompakter Roboterendeffektor konstruiert und aufgebaut. Seine Inbetriebnahme und Validierung wird als Ausblick in die Zukunft vorgestellt.

1. EINFÜHRUNG

Bei der neuesten Entwicklung der Passagierflugzeuge wird annähernd der komplette Rumpf aus CFK-Bauteilen hergestellt. Neben dem geringen Gewicht und der hohen Belastbarkeit auf der einen Seite gibt es auch einige negative Eigenschaften, die eine industrielle Fertigung sehr kostspielig machen, wie z.B. die geringe elektrische Leitfähigkeit. In Flugzeugen, die aus Leichtmetall oder Aluminium gefertigt sind bildet der Rumpf einen natürlichen Faraday'schen Käfig, der das Flugzeug und die Passagiere vor den Auswirkungen eines Blitzeinschlags schützt. Dieser Faraday'sche Käfig muss bei Flugzeugen mit hohem CFK-Anteil als zusätzlicher Fertigungsschritt auf die Außenhaut aufgebracht werden. Die (Blitz-)Schutzschicht besteht aus einem dünnen Kupferdraht eingebettet in eine Epoxy-Matrix. Gegenwärtig werden die abzulegenden Prepregbahnen durch mehrere Werker manuell geschnitten und passgenau auf der Außenschale positioniert. Die nachfolgende Drapierung stellt eine besondere Herausforderung dar: Einige der Rumpfsegmente weisen eine zweifache Krümmung der Oberfläche auf, was eine falten- und verzugsfreie Drapierung des Blitzschutzprepregs schwierig macht.

Die Automatisierung eines solchen komplexen Prozesses ist nicht einfach und kann nur in mehreren Schritten erfolgen. Die ersten Arbeiten erfolgten im Rahmen des Projektes AZUR [1] und werden im Projekt RoCK [2] weiter geführt. Das Paper stellt die wichtigsten Arbeiten und Zwischenschritte in der Entwicklung des Endeffektors dar. Zunächst werden die Anforderungen an den Endeffektor vorgestellt aus denen sich die konzeptionellen Überlegungen ergeben. Diese wurden innerhalb einer Versuchsreihe experimentell validiert und gegebenenfalls angepasst. Ausgehend von den Ergebnissen wurde ein Versuchswagen konstruiert, an dem die einzelnen Prozessabläufe mit Originalmaterial untersucht werden konnten und eine Abschätzung der Prozessparameter möglich war (Kapitel 2). Die Ergebnisse sind in die Kon-

struktion des kompakten Roboterendeffektors eingeflossen. Die Konstruktion und der Aufbau sowie die Anbindung des Endeffektors stellt Kapitel 3 dar. Das Validierungskonzept wird im Kapitel 4 vorgestellt.

2. VORVERSUCHE

2.1. Anforderungen

Der Endeffektor soll das Auftragen einer elektrisch leitfähigen Schicht auf die CFK-Außenhülle eines modernen Passagierflugzeugs übernehmen. Da es sich um einen komplexen Fertigungsprozessschritt handelt, der bisher von mehreren Facharbeitern manuell durchgeführt wird, ist ein hohes Potenzial im Bereich der Kostensenkung und der Fertigungsqualität zu erkennen – vorausgesetzt, die Qualität des automatisierten Prozesses ist der manuellen Arbeit mindestens ebenbürtig. Qualitativ ausgedrückt, muss eine Bahn aus dem Blitzschutzmaterial (siehe Kapitel 2.2) entsprechend der Position auf der Außenschale parallel zur Ablage zugeschnitten werden. Die Bahn, eine zweidimensionale Geometrie, muss auf der Oberfläche der Flugzeughülle, die in einigen Bereichen nicht einfach, sondern zweifach gekrümmt ist, falten- und verzugsfrei drapiert werden (BILD 1).

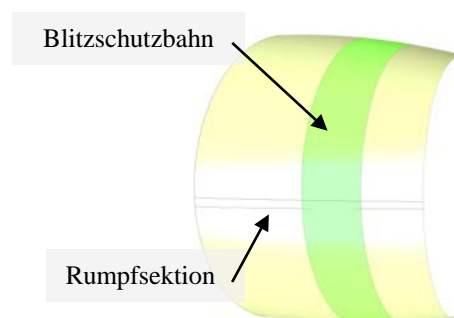


BILD 1. Bahn des Blitzschutzmaterials (dunkel) auf der hinteren Sektion der Rumpfaußenhaut.

Der Überlapp der einzelnen Bahnen soll nach den Fertigungsvorgaben zwischen 15 und 20 mm betragen um eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit zwischen den benachbarten Bahnen zu gewährleisten, das Gewicht jedoch nicht unnötig zu steigern. Dadurch ergibt sich eine Positionsgenauigkeit von $\pm 2,5$ mm. Weiterhin wird gefordert, dass der Endeffektor zu bestehenden industriellen Lösungen – hier einer standardisierten Roboterzelle – kompatibel ist. Anhand dieser Forderungen wurden folgende Merkmale festgelegt [3] :

- Ablegegenauigkeit von ± 2 mm
- Falten- und verzugsfreie Drapierung
- Keine Verunreinigung des Prepregs
- Einfache Bestückung mit Originalmaterial mit einer Breite von 890 mm
- Aufsammeln der Schutzfolie- und Trägerpapierreste
- Gesamtgewicht mit Material unter 210 kg

2.2. Material und Komponenten

Das Blitzschutzmaterial besteht aus drei Schichten: einer (orangenen) Schutzfolie, dem Prepreg mit dem aufgebracht Kupfernetz und einem Trägerpapier. Das Kupfernetz wird aus einer dünnen Kupferschicht durch einschneiden und spreizen hergestellt und hat eine Stärke von 0,16 mm einschließlich des Prepregs.

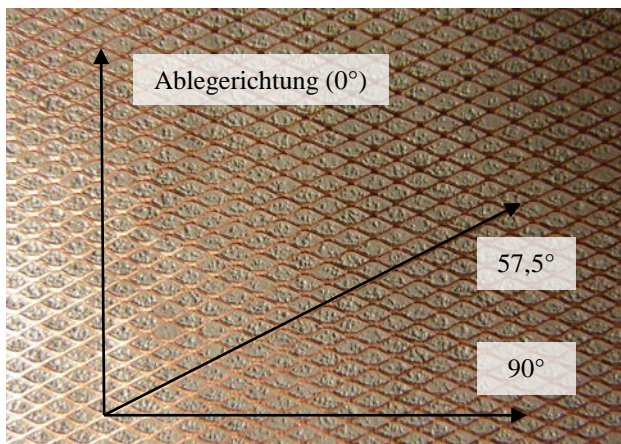


BILD 2. Blitzschutzmaterial: Kupfernetz auf Prepreg (mittlere Schicht)

Das Kupfernetz kann durch äußere Krafteinwirkung deformiert oder beschädigt werden. Um die maximale Kraft abzuschätzen, mit der das Material im Endeffektor unter Spannung gehalten werden kann, wurden am Originalmaterial Zugversuche durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden.

2.2.1. Zugversuche

Bei den Versuchen handelt es sich um Kraft-Weg-

Untersuchungen, die an unterschiedlich präparierten Proben durchgeführt wurden. Die Abmaße der Proben betrugen 200 mm x 50 mm. Der wichtigste Versuchsparameter war die Richtung der Krafteinwirkung die dem BILD 2 entnommen werden kann. Weitere Parameter waren die Temperatur (gekühlt vs. Raumtemperatur) und Verstärkung mit Schutzfolie. Während die zwei letzten Parameter nachrangig sind, besitzt die Streckrichtung einen enormen Einfluss auf den Prozess, da hier zum einen kritische Kräfte abgelesen werden können und zum anderen die experimentellen Ergebnisse die nicht triviale FEM-Simulation einer Verscherung stützt, die für die Planung der Zuschnitte (Bahnen) verwendet wird. Die Schwierigkeit der korrekten Simulation, hier mit CATIA V5 Composites, liegt in den Simulationsannahmen: Vernachlässigung des Harzes und ein Kupfernetz aufgebaut aus geraden Kupferlitzen die über Gelenke an den Kreuzungspunkten verbunden sind. Die so gewonnenen Ergebnisse entsprechen einer Verscherung (und nicht Stauchung/Dehnung) und sind im Gegensatz zum realen Material isotrop. Als Ergebnis wurde eine maximale Streckung von 2 % (0,29 %) in der Ablegerichtung mit 0° (90°) im elastischen Bereich gemessen, die entsprechenden E-Moduln betrugen 125 MPa (1207 MPa), die korrespondierenden Kräfte 41 N (353 N) [4].

2.2.2. Abzugskraft

Die Abzugskraft eines bereits abgelegten Prepregs spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Diese soll ausreichend groß sein, damit die Schutzfolie, über die das Prepreg drapiert wird, das Material beim Abziehen nicht von der Ablagefläche löst. Somit ist die Abzugskraft ein wichtiger Prozessparameter für die Konzeption des Ablegers und wurde experimentell bestimmt. Der Versuchsaufbau ist im BILD 3 dargestellt. Das Material wird mit einer definierten Gewichtskraft (6,87 N) und definierten Zeit (3 bzw. 6 s) auf die Unterlage (Aluminium) gepresst. Diese kann unter einem variablen Winkel (30°, 45° und 55°) zum handbetriebenen Zahnstangenantrieb fixiert werden. Das Prepreg wird eingeklemmt und über Haken und Federwage an den Zahnstangenantrieb befestigt. Dieser wird nach oben bewegt und löst das Prepreg in der Ablegerichtung (siehe BILD 2) von der Unterlage ab. Der Maximalwert der Kraft wird als die Abzugskraft ermittelt.

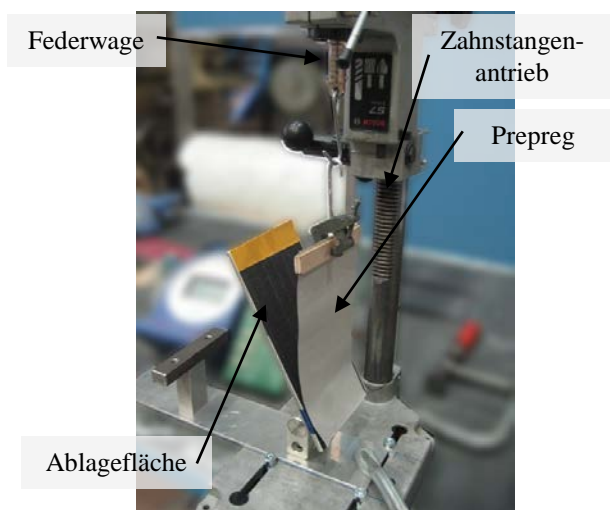


BILD 3. Versuchsaufbau zur Bestimmung der Abzugskraft (hier ohne Schutzfolie).

Die höchsten Kräfte, über 6 N, ergaben sich für 30° und 6s Anpresszeit, gefolgt von 45° und 6 s. Die Messungen mit dem Winkel von 55° hatten dagegen sowohl für 3 s wie auch 6 s sehr geringe Abzugskräfte [3].

2.2.3. Drapierbürste

Die Drapierung mit Hilfe einer Bürste, die das Prepreg (über die Schutzfolie) auf der Ablegefläche glatt streicht und eventuell entstandenen Falten sowie Lufteinschlüsse beseitigt, wurde im Labormaßstab getestet. Die ersten Vorversuche erfolgten auf einer doppelt gekrümmten Oberfläche (Druckkalottenform) mit Originalmaterial und einer handelsüblichen Handbürste. Da dadurch gute Ergebnisse erreicht worden sind, wurden weitere Versuche mit einer rotierenden Bürste nachgeschaltet. Dabei wurde(n) die Bürste(n) in ein auf Schienen fahrbares Gestell eingebaut und über eine Digitalwaage bewegt. Der Anpressdruck der Bürste wurde durch die Tiefenstellung und somit durch das Verbiegen der Borsten gesteuert. Die Bürste wurde mit Hilfe eines Elektromotors angetrieben. Der Versuchsaufbau ist in BILD 4 zu sehen. Die Bürste besteht aus drei Elementen, die die Waagenbreite von 305 mm abdecken. Es wurden mehrere Konfigurationen der Bürstenzusammensetzung getestet, die sich in Dichte, Stellung (gerade, Spirale) und Stärke (0,2 mm und 0,3 mm) der Borsten unterscheiden. Die Anpresskraft der Bürste skaliert annähernd mit der Tiefenstellung und ist wie erwartet für die Bürste mit der dichtesten Anordnung und den stärksten Borsten am größten. Dabei hat die Stärke der Borsten deutlich größeren Einfluss auf die Anpresskraft als deren Dichte. Bezogen auf ein Bürstenelement von 100 mm Länge, liegt die Anpresskraft für die tiefste Stellung von 6 mm unterhalb der Nullposition bei ca. 24 N [5].

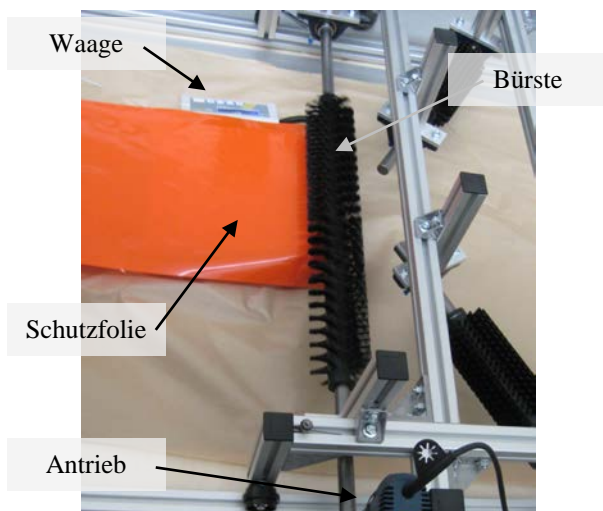


BILD 4. Versuchsaufbau zum Test der Drapierbürsten

2.3. Versuchswagen

Der Versuchswagen wurde durch die Firma Emil Bucher GmbH aufgebaut und in den Räumen des DLR in Augsburg getestet.

2.3.1. Aufbau des Versuchswagens

Im Aufbau des Versuchswagens wurde das Konzept des Ablegers verwirklicht [5]. Dieser wurde aus ITEM-Profilen

konstruiert und großzügig dimensioniert. Dies ermöglicht die Validierung der einzelnen Komponenten sowie deren Anpassung durch gute Zugänglichkeit und hohe Flexibilität. Folgende Anforderungen wurden an das Konzept des Versuchswagens gestellt:

- Verwendung des bereits in der Fertigung eingesetzten Blitzschutzmaterials
- Zuschnitt der Materialbahn
- Falten- und verzugsfreies Ablegen und Drapieren des Blitzschutzmaterials

Das BILD 5 stellt den Aufbau des Versuchswagens dar. Die Rollen A1 bis A3 (A1 Materialrolle, A2 Sammelrolle Trägerpapier, A3 Sammelrolle Schutzfolie) sind für den Materialfluss zuständig, die Linearachsen L1 und L2 bewegen die Ultraschallmesser für den Bahnzuschnitt. Sie werden allesamt elektrisch angetrieben. Die Wellen D1 und D2 werden pneumatisch angetrieben und tragen die Drapierbürsten. Die Anpresswelle U4 wird nicht angetrieben und dreht sich synchron mit der Bewegung des Wagens auf der Unterlage, was eine gute Ablage des Materials begünstigt. Die Wellen U1, U2, U3 und U5 sind ebenfalls passiv und unterstützen den Materialfluss. Das untere Foto im BILD 5 zeigt den aufgebauten Versuchswagen, jedoch ohne die Schneideeinheit L1+L2.

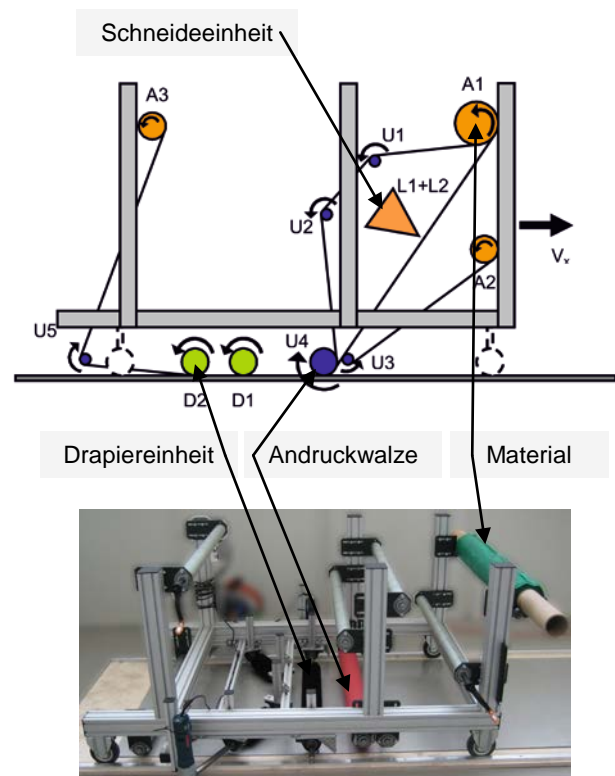


BILD 5. Aufbau des Versuchswagens

Die Funktionsweise des Versuchswagens (und des späteren Roboterendeffektors) ist folgende: Das Originalmaterial wird in die Welle A1 eingelegt. Beim Abwickeln wird die Schutzfolie getrennt und separat geführt (U1 und U2). Das Blitzschutzprepreg und das Trägerpapier wird durch die Schneideeinheit L1+L2 geführt und mit Hilfe von Ultraschallmessern auf die gewünschte Bahn zuge-

schnitten, ohne das Trägerpapier zu beschädigen. Kurz vor der Anpresswelle U4 wird das Prepreg vom Trägerpapier aufgetrennt (U3) und wieder mit der Schutzfolie zusammengeführt. Die Anpresswelle U4 drückt das Prepreg über die Schutzfolie auf die Unterlage, die nachfolgenden Bürstenwellen D1 und D2 drapieren (ebenfalls über die Schutzfolie) das Prepreg auf der Unterlage. Die Rolle U5 sorgt für die Ablösung der Schutzfolie vom Prepreg und führt diese zur Welle A3. Diese sammelt die Schutzfolie, ähnlich wie die Rolle A2 das Trägerpapier. Die Vorwärtsbewegung des Versuchswagens wird durch eine elektrisch betriebene Seilwinde bewerkstelligt. Der Wagen rollt dabei auf Schienen, als Ablagefläche werden Aluminiumplatten zwischen den Schienen verwendet. Die Drehmomente der Wellen A1 – A3 werden mit Hilfe von aufgehängten und umgelenkten Gewichten aufgebracht, die Lineareinheiten L1 und L2 werden mit Akkuschrauben angetrieben, siehe BILD 6.

2.3.2. Validierung der Konzepte

Anpressrolle U4 und Materialfluss

Die ersten Versuche fanden ohne die Schneideeinheit statt und hatten zum Ziel den Materialfluss und die Anpresswelle zu validieren [5]. Das faltenfreie Ablegen der kompletten Materialbreite war hierbei das Validierungskriterium. Es wurden mehrere Versuche durchgeführt bei denen die Komplexität bzgl. des Materialweges und des Aufbaus kontinuierlich gesteigert wurde. Dabei wurde das Prepreg mit und ohne Schutzfolie und mit unterschiedlichen Drapiermethoden (mit und ohne Drapiereinheit/Anpressrolle) abgelegt.

Das Ergebnis: größere Bereiche der abgelegten Fläche waren faltenfrei. Die entstandenen Falten hatten hauptsächlich ihren Ursprung in der unregelmäßigen Bewegung des Wagens (Stopps, Anfahren), durch ungleichmäßige Verteilung der Kräfte im Material (Prepreg, Schutzfolie) und zu schwache Anpresskraft der U4. Als wichtigster Faktor wurde die Parallelität der Wellen für eine gleichmäßige Spannung des Materials entlang einzelner Wellen ausgemacht. Des Weiteren wurde das Konzept um einen Folienspeicher – einer flexibel gelagerten Zusatzwelle für die Schutzfolie – erweitert. Diese soll die Spannungen im Prepreg und der Schutzfolie ausgleichen sowie an Anfang und Ende einer Bahn die Lauflängenunterschiede zwischen Schutzfolie und Prepreg ausgleichen. Außerdem wurde die Andruckwelle U4 mit einer härteren, gummierten Walze ausgestattet.

Drehmomente

Die Anpresswelle U4 soll sich im Betrieb im so genannten „statischen Gleichgewicht“ befinden um frei mit der Ablegegeschwindigkeit des Wagens auf der Ablagefläche abzurollen. Das wird erreicht wenn die Antriebs- und Bremsmomente der Wellen A1 bis A3 so gesteuert werden, dass sie sich in Summe aufheben. Mehrere Antriebskonzepte wurden ausgearbeitet und bewertet [6]. Im ausgewählten Konzept haben die Antriebe an A2 und A3 ein beschleunigendes Drehmoment, an A1 ein bremsendes. Über die Beträge der Momente kann die Spannung im Material gesteuert werden bis zu einer maximalen Beanspruchung aus Kapitel 2.2. Dabei ergaben sich folgende Momente: $M_{A1} = -4,41 \text{ Nm}$, $M_{A2} = 1,36 \text{ Nm}$ und $M_{A3} = 1,30 \text{ Nm}$. Was später im Endeffektor von drehmo-

mentgesteuerten Antrieben übernommen wird, wurde im Versuchswagen durch aufgehängte Gewichte realisiert, siehe BILD 6. Zusätzlich wurden die Reibmomente der einzelnen Wellen bestimmt sowie der Rollwiderstand des Wagens. Die Vorwärtsgeschwindigkeit des Ablegewagens (die Ablegegeschwindigkeit V_x) wurde zwischen 3,4 und 9 m/min variiert. Mit dieser Konfiguration wurden weitere Versuche durchgeführt.

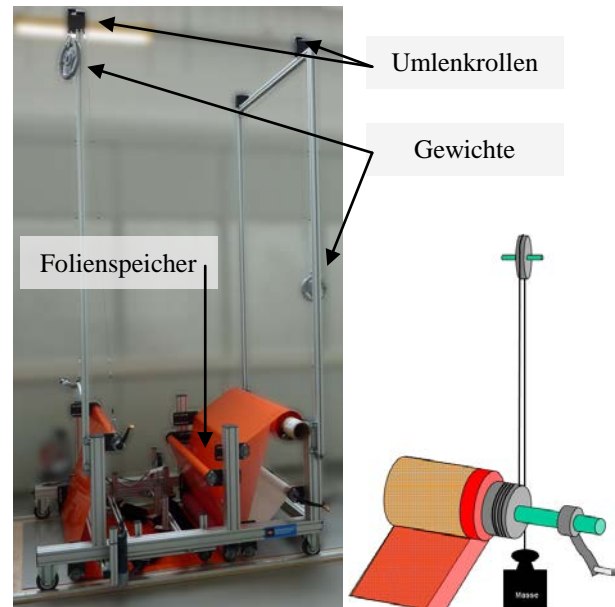


BILD 6. Versuchswagen mit Antriebsgewichten und Folienspeicher. Rechts: Konzept der Aufbringung der Drehmomente an die Wellen.

Die Ergebnisse der Versuche zeigten, dass eine schnelle Vorwärtsbewegung ein ruckartiges Ablösen der Schutzfolie vom Prepreg an A1 sowie ein kritisches Ablösen des Materials an A2 und A3 bewirkt was zu einer verstärkten Faltenbildung führt. Eine Geschwindigkeitsreduzierung um ca. 50% hat das Ablegebild verbessert. Zusätzliche Reduzierung der Faltenbildung wurde erreicht, indem man die Drehmomente der Wellen A1 und A3 durch zusätzliche Gewichte und somit die Materialspannung erhöht hat. Gleichzeitig wurde das Drehmoment an A2 reduziert. Das Ablösen an A1 wurde durch ein Versetzen der Umlenkwalze U1 und Erhöhung des Abzugswinkels von 58° auf 73° verbessert. Dieser Anpassung der Konfiguration erlaubte eine faltenfreie Ablage über 3 m Länge auf den verwendeten Aluminiumplatten, siehe BILD 7.

2.3.3. Ablegen auf gekrümmten Oberflächen

Die Herausforderung das Blitzschutzmaterial falten- und verzugsfrei zu drapieren erhöht sich, wenn die Ablageunterlage von ebener in gekrümmte Geometrie wechselt. Während bei einer einfachen Krümmung eine Ablage eines zweidimensionalen Materials (hier Prepreg) noch theoretisch möglich ist, ist dies bei einer zweifach gekrümmten Geometrie nicht mehr der Fall. Ein „Glattstreichen“ (Drapieren) ist notwendig da die Andruckwalze nicht mehr über die komplette Bahnbreite das Material an die Ablage drückt. Dieser Prozess kann sowohl eine(n) Verscherung (Verzug) des Materials sowie Faltenbildung bewirken. Die Ablageflächen für die der Einsatz des Endeffektors vorgesehen ist, wie z.B. die hintere Rumpfsektion des A350, sind zweifach gekrümmt.

Daher ist eine gute Drapierbarkeit auf zweifach gekrümmten Oberflächen eine Voraussetzung für den zu entwickelnden Endeffektor.

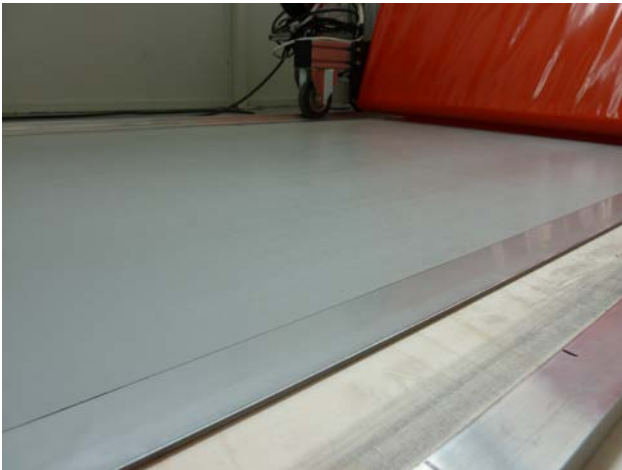


BILD 7. Faltenfreie Ablage mit Versuchswagen.

Die Krümmung der Versuchsoberfläche wird erzeugt, indem man unter die Aluminiumplatten, die beim Versuchswagen als Ablegefläche dienen, Abstandhalter von 6mm Höhe positioniert. Diese wölben die Platten an dieser Stelle und erzeugen so eine Krümmung. Die Platten werden an den Rändern fixiert. Es wurde sowohl eine symmetrische wie auch asymmetrische Krümmung untersucht, siehe BILD 8. Die folgenden Versuche wurden aus Kostengründen mit einem Glasprepreg anstatt des originalen Blitzschutzmaterials durchgeführt.

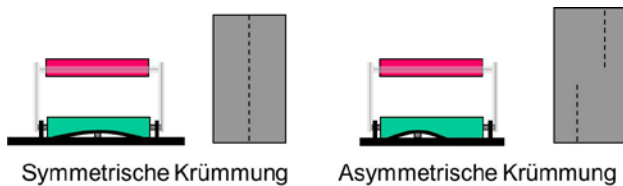


BILD 8. Erzeugen einer zweidimensionalen Ablegefläche.

Die ersten Versuche, noch ohne eine Drapiereinheit, zeigten eine nahezu faltenfreie Ablage in der Mitte der Bahn. Seitlich wurde starke Faltenbildung beobachtet, die durch das Ablösen der Schutzfolie vom bereits abgelegten Prepreg verstärkt wurde. Als Ursache wurde ein geringes Haften des Prepregs auf der Ablage vermutet.

Weitere Versuche fanden mit einer der Andruckwelle nachgeschalteten Drapiereinheit statt. Diese bestand aus zwei kurzen (0,3 m) Bürstenelementen auf den Seiten parallel zur Andruckwelle. Trotz mehrmaliger Anpassung der Einstellhöhe der Bürsten – und damit des Anpressdrucks – ließ sich kein gutes Ablegeergebnis erzielen. Dabei war durchgehend der mittlere Teil der Bahn faltenfrei, die seitlichen Bereiche zeigten jedoch eine starke Faltenbildung. Der Versuch die Drehrichtung der Bürsten zu ändern, jetzt entgegen der Ablegerichtung, zeigte eine starke Verbesserung und ein durchgehend gutes Ablegeergebnis. Die Erklärung ist hier, dass die Bürsten bei einer Bewegung entgegen der Ablegerichtung das Material unter Spannung halten. In weiteren Versuchen wurde die Drapiereinheit modifiziert, indem man zwischen die seitlichen Bürstenelemente noch ein drittes Element

montierte. Die Stärke der Borsten der seitlichen Bürsten wurde erhöht und von spiralförmigen auf eine gleichmäßige Verteilung der Borsten gewechselt. Die Faltenbildung, die beim Abziehen der Schutzfolie vom abgelegten Prepreg beobachtet wurde hat ihre Ursache in der Haftung zwischen Schutzfolie und Glasprepreg, die im Vergleich zum Originalmaterial größer ist, siehe Kapitel 2.2.2 Dieses Problem sollte daher beim Ablegen von Originalmaterial nicht auftreten, vor allem nicht bei der Ablage auf ein Originalrumpfsegment aus CFK. Die Überlegung wurde experimentell nachgewiesen, indem das Glasprepreg auf ein zuvor aufgebracht Prepreg abgelegt wurde. Das Ergebnis war eine durchgehend faltenfreie Oberfläche, die nur an den Anfahrtspositionen des Wagens Falten zeigte. Ähnliche Versuche wurden mit der asymmetrischen Krümmung durchgeführt. Hier zeigte sich deutlich, dass der Anpressdruck der Bürsten einen viel größeren Einfluss auf das Ablegeergebnis hat, als die Stellung (gerade, schräg) der Borsten. Ebenfalls zeigte eine parallel zur Andruckwelle angebrachte Drapiereinheit, die die gesamte Ablegebreite überspannte bessere Ergebnisse als eine kurze Bürste in der Mitte der Bahnen mit zwei schräggestellten seitlichen Bürsten, welche zusätzliche Spannungen in das Material einbringen was die Faltenbildung begünstigt.

Beim Versuchsaufbau mit zweifach gekrümmter Ablegefläche wurde die Erhöhung abwechselnd links und rechts 150mm von der Seitenkante angebracht, siehe BILD 9.

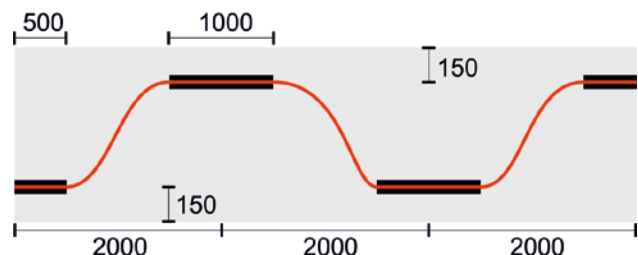


BILD 9. Versuchsaufbau zur Erzeugung einer zweifach gekrümmten Ablegefläche. Der Verlauf der höchsten Stelle ist durch die rote Linie gekennzeichnet.

Die Versuche das Glasprepreg auf die Aluminiumfläche abzulegen ergeben bei der zuvor beschriebenen Konfiguration der Bürsten und einem starken Anpressdruck sehr gute Ergebnisse. Weitere Versuche zeigen, dass die Anordnung der Bürsten und eine nicht angetriebene Drapiereinheit eine geringfügig schlechtere Ablage ergibt. Die nachfolgenden Versuche mit Originalmaterial bestätigten die bisherigen Ergebnisse [6].

2.3.4. Schneideeinheit

Der Zuschnitt der abzulegenden Bahn soll im Endeffektor während dem Ablegeprozess in Echtzeit erfolgen. Die Bahn wird beidseitig mit je einem Ultraschallmesser auf einem Linearachsenschlitten zugeschnitten. Die Messer sind um 90° drehbar, damit sowohl die Kontur der Bahn in Ablegerichtung wie auch der Schnitt an Bahnende/-anfang quer zur Ablegerichtung erzeugt werden kann. Die Herausforderung dabei ist das Prepreg mit dem Kupfernetz (Gesamtstärke 0,16 mm) komplett durchzuschneiden ohne das Trägerpapier (Stärke 0,14 mm) zu verletzen. Bei den Tests wurde fast ausschließlich der Schnitt quer zur Ablegerichtung (Bahnanfang/-ende) un-

tersucht wofür es drei Hauptgründe gab: Materialeinsparung, größerer Schwierigkeitsgrad da konstante Schnittqualität über die gesamte Breite der Schneideinheit nötig und bessere Zugänglichkeit, da eine gesteuerte Materialführung zu diesem Zeitpunkt nicht vorhanden war. Die Justierung der Schnitttiefe erfolgte an der Messerbefestigung sowie an der Halterung der Gegenplatte an der das Material unter den Messern geführt wurde.

Die Ergebnisse zeigen große Streuung. Es ist sehr aufwändig für beide Messer (einzeln) die optimale Einstellung der Schneidetiefe zu finden. Zudem ist es schwierig die Lage der Gegenplatte so einzustellen, dass beide Messer ein gutes Ergebnis liefern. Das System reagiert sensibel auf Temperatureinflüsse, wie das Aufwärmen der Messer oder Temperaturschwankungen in der Testumgebung und mechanischen Schwingungen. Dadurch war ein systematischer Test der Schnittqualität nicht möglich. Dennoch wurde gezeigt, dass eine ausreichende Präzision möglich ist [7]. Unter diesem Gesichtspunkt musste der Endeffektor steifer und mit geringeren Toleranzen, als der Versuchswagen gebaut werden. Zudem werden die Messer mit einer Luftkühlung ausgestattet und sowohl die spätere Test- wie auch Einsatzumgebung wird klimatisiert sein.

2.3.5. Ablösekeil

Die Erfahrungen aus vorhergehenden Tests zeigten, dass der Ablösevorgang des Prepregs vom Trägerpapier unterstützt werden muss. Die vorhergesehene Umlenkwalze U3 wurde daraufhin gegen einen Keil mit einem spitzen Winkel ausgetauscht der dicht vor und parallel zur Andruckwalze U4 liegt, siehe BILD 10.

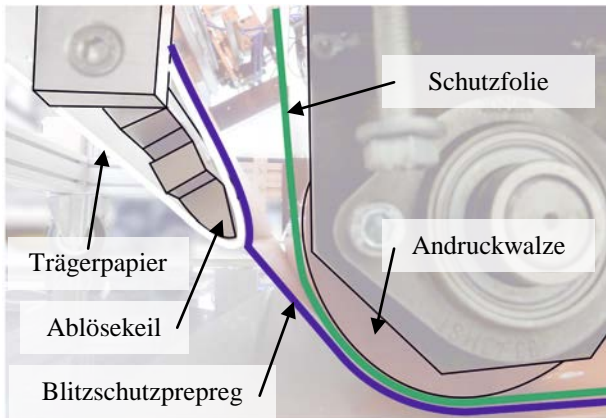


BILD 10. Funktionsweise des Ablösekeils

Die Funktion des Keils wurde grundsätzlich verifiziert, jedoch ist eine, im Vergleich zu bisherigen Versuchen, höhere Spannung im Material, notwendig. Diese wurde zwar nicht quantifiziert, liegt aber noch innerhalb des elastischen Bereichs des Kupfernetzes. Darüber hinaus wurden folgende kritische Prozessfaktoren ausgemacht:

- Die Materialspannung am Keil muss auf seiner Länge konstant sein, damit das Material über die gesamte Keilbreite gleichmäßig stark an den Keil gepresst wird
- Das Trägerpapier darf beim Beschneiden nicht verletzt werden. Das eingeschnittene Trägerpa-

pier reißt aufgrund der hohen Spannung am Keil ab.

Ein weiteres Problem ergab sich durch die Tendenz des abgelösten Prepregs sich unter dem Einfluss der Schwerkraft nach unten zu wölben. Das Prepregmaterial sackte unmittelbar nach dem Keil und noch bevor es mit der Schutzfolie die Andruckwalze erreicht hatte nach unten ab [7]. Die konstruktive Lösung wurde in Form einer Führungsschiene konzipiert. Diese befindet sich im Materialfluss nach dem Ablösekeil. Die Validierung wird jedoch erst am fertig konstruierten Endeffektor erfolgen.

Die Ergebnisse der oben beschriebenen Versuche sind maßgeblich in die Konstruktion des Endeffektors eingeflossen. Diese Aufgabe wurde im Projekt AZUR vom Projektpartner Emil Bucher GmbH & Co. KG übernommen und durchgeführt. Während der Konstruktion wurden Konzepte zur Sensorik und Steuerung, Roboteranbindung und Regelung entwickelt. Dies soll im nachfolgenden Kapitel erläutert werden.

3. ENDEFFEKTOR

3.1. Konstruktion

Die Grundstruktur des Endeffektors besteht aus zwei massiven Aluminiumplatten, die durch Querstreben verbunden sind und zwischen denen sich die Materialwalzen, die Schneide- und die Draapiereinheit sowie der Ablösekeil befinden. Die Kupplungen für die elektrischen Antriebe wurden auf den Außenseiten der Platte vorgesehen um den Endeffektor möglichst kompakt zu gestalten und den Materialfluss nicht zu stören. Neben dem Roboterflansch wurde Platz für eine Ventilinsel sowie Datenbuskomponenten vorgesehen. Ausgehend von dem Sensorikkonzept wurden Einbaupositionen sowie Halterungen für Sensoren freigelassen bzw. konstruiert. Der aufgebaute Endeffektor ist in BILD 11 zu sehen. Die Gesamtmasse des Endeffektors, mit Antrieben und einer

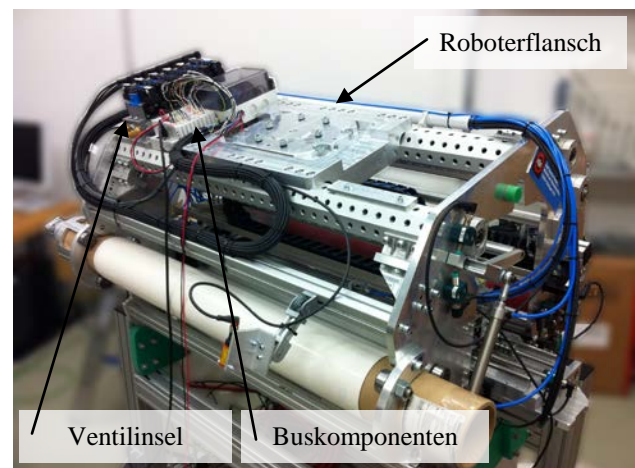


BILD 11. Aufgebauter Endeffektor

vollen Materialrolle, beträgt knapp unter 210 kg, was dem für die Validierung vorgesehenen Roboter, einen KUKA Quantec 210, die volle Reichweite erlaubt. Die Medienzuführung (Druckluft, Ethernet-Verbindung, Netz- und Kleinspannung) kann direkt von der durch Roboter angebotenen Schnittstelle abgegriffen werden. Die Ultraschall-

generatoren, aufgrund des hohen Gewichts, wurden aus der Konstruktion rausgenommen und für eine Montage auf der dritten Achse des Roboters vorgesehen.

3.2. Bussystem und Sensorik

Das Sensorikkonzept wurde anhand der Anforderungen sowie Beobachtungen während der Experimente am Versuchswagen erstellt. Die Sensorikauslegung [7] beschränkt sich auf Sensoren die die Funktion und Prozessparameter des Endeffektors überwachen, siehe TAB. 1. Zunächst wird im dem Rahmen der Funktionsvalidierung auf Sensorik zur reinen Qualitätskontrolle verzichtet.

TAB 1: Sensorikaufstellung

Bez.	Funktion	Art
S1	Füllstandüberwachung	Laser-Distanzmesser
S4	Längenmessung	Drehgeber
S2,S3 S10	Bahnkantenüberwachung	Laser-Lichtschranke
S6,S8 S9	Zustandserkennung Messer, Speicher, Anpresswalze	Näherungsschalter
S11	Kollisionsschutz Messer	Näherungsschalter
S5,S7	Materialrisskontrolle	Gabellichtschranke

Die Position der Sensoren ist dem BILD 12 zu entnehmen.

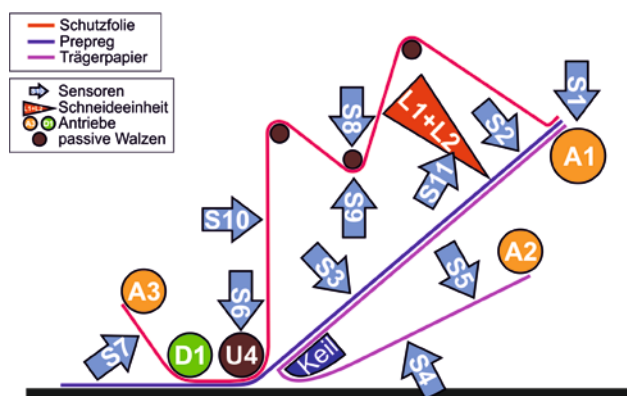


BILD 12. Position der Sensoren

Die Sensoren wurden im Rahmen einer Masterarbeit [8] in ein EtherCAT-Bussystem integriert. Das Bussystem besteht aus Buskopplern der Fa. Beckhoff, die anhand der Signale der verwendeten Sensoren ausgewählt wurden. Das Bussystem wurde mittels TwinCat-Software als Software-SPS konfiguriert. Die Software erlaubt eine bequeme softwareseitige Anbindung der Buskomponenten. Nachdem die Funktionalität der Sensoren überprüft wurde, wurden System-Eingangs- und Ausgangsvariablen für das Bussystem konfiguriert und visualisiert. Die

Funktionsweise der regelungskritischen Messsensoren S1-S4 und S10 wurde mit einfachen Versuchen überprüft und mit einer Messgenauigkeit von ca. 10% abgeschätzt [8].

3.2.1. Pneumatik und Aktorik

Die pneumatischen Komponenten werden von einer Ventilinsel gesteuert, die aus sechs bistabilen Ventilen besteht. Diese werden ebenfalls über das Bussystem angesteuert. Die Ventile steuern Druckluft zur pneumatischen Steuerung des Folienspeichers, der Drehung und Senkung der Ultraschallmesser, dem Antrieb der Drapiereinheit sowie der Luftkühlung der Ultraschallkonverter. Die Steuerung der Antriebe A1 bis A3, sowie der Linearachsen der Schneideeinheit L1 und L2 soll von der Robotersteuerung übernommen werden und wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3.3. Steuerung

Das Steuerungskonzept des Endeffektors sieht sechs Zustände vor in denen sich der Endeffektor befinden kann: Bahnanfang und -ende, Ablegeprozess, Stillstand, Einstellung des Speichers sowie das Nachrüsten des Endeffektors mit Material [7]. Jeder der Zustände bedarf eigener Steuerung der Antriebe wobei der Ablegeprozess der komplexeste ist und hier beispielhaft beschrieben wird. Während der Ablage muss die Andruckrolle U4 frei beweglich sein und mit der Bewegung des Roboters auf der Ablage „abrollen“ um keine zusätzliche Spannung in den Materialfluss einzubringen. Die Rolle muss sich in einem „stabilen“ Gleichgewicht befinden, jedoch die gesamte Zeit über muss das Material Spannung aufweisen. Das Abwickeln des Materials soll alleine durch die Bewegung der Andruckrolle U4 über die Ablegefläche erfolgen. Daraus ergibt sich die Forderung, dass die Materialrolle A1 und die Wellen A2 und A3 zum Aufwickeln der Materialreste momentengeregelt sein müssen um für genügend Spannung im Material zu sorgen und das Material dennoch mit geringen Kraft an U4 bewegen zu können.

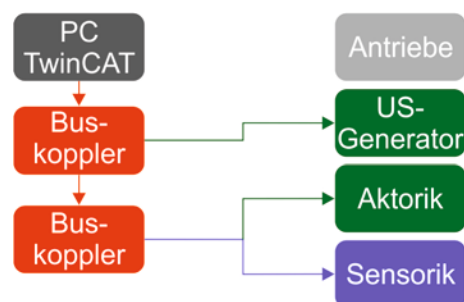


BILD 13. Steuerungskonzept bei Inbetriebnahme außerhalb der Roboterzelle

Eine zusätzliche Herausforderung ist es die Messerbewegung Roboterbahn- und positionsabhängig zu steuern. Das Konzept sieht vor, dass die Bahnplanung offline vor dem Ablegeprozess für jede Schale erstellt wird und der Zuschnitt der Blitzschutzbahn während der Roboterbewegung erfolgt. Das erfordert eine hohe Synchronität der Antriebe des Roboters und der Antriebe – im Speziellen der Linearachsen der Schneideeinheit – des Endeffektors. Aus diesem Grund ist es geplant das Technologiepaket Extended Motion (XM) von KUKA

einzusetzen. Das Paket erlaubt eine Erweiterung der Steuerungskinematik eines QUANTEC-Roboters um bis zu 6 zusätzliche Achsen, die alle synchron gesteuert und geregelt werden können. Im Falle des Endeffektors werden die Antriebe A1-A3 sowie die Linearachsen der Messer L1+L2 und die Linearachse des Roboters mit XM gesteuert. Das Paket in der Version KRC4 befindet sich zum jetzigen Zeitpunkt noch in der Entwicklung, wird aber im Prototypenstatus im dritten Quartal 2013 an das ZLP in Augsburg ausgeliefert. Es erlaubt die standardisierte Robotersteuerung zeitkritisch auf die Steuerung der Endeffektorantriebe anzuwenden.

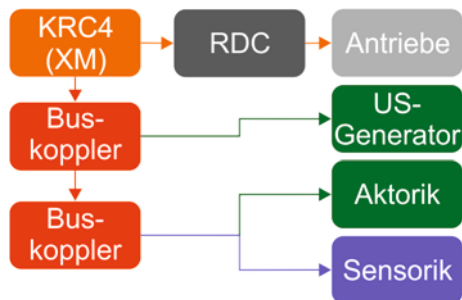


BILD 14. Steuerungskonzept am Roboter

Damit die im Kapitel 3.2 beschriebenen Sensoren der Robotersteuerung zur Verfügung stehen, muss die Konfiguration des Bussystems von TwinCAT in die KUKA Roboter Language (KRL) übertragen werden was mittels eines KUKA Office PC und der Work Visual-Software bewerkstelligt wurde [8]. Mit der Anbindung des Endeffektors an die XM-Steuerung wird die Steuerungshardware die Funktion des Office PC übernehmen. Die Steuerungskonzepte in und außerhalb der Roboterzelle zeigt das BILD 14 bzw. BILD 13.

Eine Regelung der Roboterbahn und der Antriebe des Endeffektors wird erst mit der Robot Sensor Interface-Software (RSI) möglich sein. Die sensorgestützte Regelung ist wichtig um anhand der Sensordaten, z.B. der Kantenposition des Materials, auf eine Abweichung zu reagieren und dieser entgegen zu wirken.

Ein weiterer Vorteil der XM-Hardware (Extended Schrank) ist, dass sie unabhängig von einem Roboter betrieben werden kann, wobei die sechs Roboterachsen softwareseitig simuliert werden können. Dadurch kann die Programmierung der Endeffektorachsen zunächst separat erfolgen. Das entlastet die kostenintensiven Roboterzellen und schafft eine Testumgebung mit deutlich niedrigeren Sicherheitsanforderungen im Vergleich zu einer vollständigen Roboteranlage.

3.4. Anbindung in die Roboterzelle

Nachdem die Steuerung des Endeffektors am Extended Schrank abgeschlossen wurde, ist die Portierung der Software und Hardware auf die Roboterachse notwendig. Die bereits erstellten Programme für die Ansteuerung des Bussystems und der Antriebe, einschließlich der Roboterachsen, kann problemlos auf die Roboterzelle übertragen werden. Ähnlich verhält es sich mit der Hardware: hier wird der bisherige Steuerschrank durch den Extended Schrank der XM-Steuerung getauscht [9]. Die für den Testbetrieb vorgesehene Roboterzelle ist die Thermoplastzelle (TPZ) des Zentrum für Leichtbauproduk-

tionstechnologie (ZLP) am Standort Augsburg. Sie verfügt über einen Quantec KRC4 Roboter mit 210 kg Maximallast und einer Linearachse.

4. AUSBLICK

Die Anbindung der XM-Steuerung sollte innerhalb weniger Wochen nach der Lieferung abgeschlossen sein. Das weitaus größere Arbeitspaket beinhaltet die Tests der Endeffektorkomponenten und Untersuchung der Prozessparameter des Endeffektors. Die ersten Tests werden noch außerhalb der Roboterzelle mit Extended Schrank und simulierten Roboterachsen durchgeführt. Nachdem kritische Prozesse wie Materialförderung, Zuschnitt und Sensorik validiert wurden, wird der Endeffektor auf einer realen Ablage validiert. Hier befindet sich die Bahnplanung sowie eine faltenfreie Ablage im Fokus.

4.1. Untersuchung außerhalb der Roboterzelle

Die geplanten Tests des Endeffektors außerhalb der Roboterzelle werden vor allem die Funktionsüberprüfung der einzelnen Komponenten des Endeffektors beinhalten. Aufgrund der bis dato fehlenden Antriebssteuerung und aus diesem Grund nicht erzeugbaren Prozessparameter (Materialspannung) waren präzise Tests der Schneideeinheit sowie des Keils nicht möglich. Mit Hilfe der momentengesteuerter Materialrollen A1 bis A3 kann die Spannung im Material reproduzierbar und zeitlich konstant eingestellt werden. Das sorgt für gleichmäßiges Verhalten des Materials innerhalb der Schneideeinheit und ist eine notwendige Voraussetzung für Justage und Untersuchung der Ultraschallmesser.

4.2. Untersuchung in der Roboterzelle

Die Validierung des Endeffektors am Roboter soll die technologischen Lösungen und die wirtschaftliche Verwendung im Hinblick auf eine fertigungsnahe Nutzung untersuchen. Gedacht ist ein Ansatz mit einem stationären Roboter, der auf eine Schale, die in einer sogenannten Turning Station befestigt ist, das Blitzschutz-prepreg ablegt. Dabei wird die Zugänglichkeit der Schalenoberfläche durch die Rotationsbewegung der Schale gewährleistet. Für die Validierung steht keine Turning Station zur Verfügung. Deswegen wird auf Tests mit einer fest montierten Schale, hier exemplarisch die hintere Sektion eines A350 mit doppelten Krümmung, ausgewichen. Der Antrieb, der für die Drehung der Schale in der Turning Station zuständig ist, wird hier durch die Linearachse des Roboters ersetzt. Die Rumpfschale wird entsprechend der CAD-Daten auf einem Gestell aus Aluminiumprofilen befestigt [10] und mit Hilfe eines Lasertrackers präzise vermessen. Dadurch kann die Bahnprogrammierung auf die Originaldaten der Schale zurückgreifen. Da sich die Genauigkeit der Ablage im großen Maß an den im Kapitel 2.1 vorgestellten Anforderungen richtet, ist der Überlapp zweier benachbarten Bahnen von großem Interesse. Deswegen muss die Validierung eine Ablage von mindestens zwei Bahnen beinhalten. Aufgrund der begrenzten Reichweite des Roboters ist die Positionierung der Schale nicht trivial und wurde mit Hilfe der Software RoboCAD unter Berücksichtigung der Geometrie und der Masse des Endeffektors genau untersucht [10]. Die Lösung wird im BILD 15 dargestellt, die Markierungen auf der Schalenoberfläche zeigen den Verlauf beider Bahnen an. Die

ersten Tests am Roboter, noch ohne Antriebe und Steuerung, bestätigten diese Ergebnisse [11], siehe BILD 16.

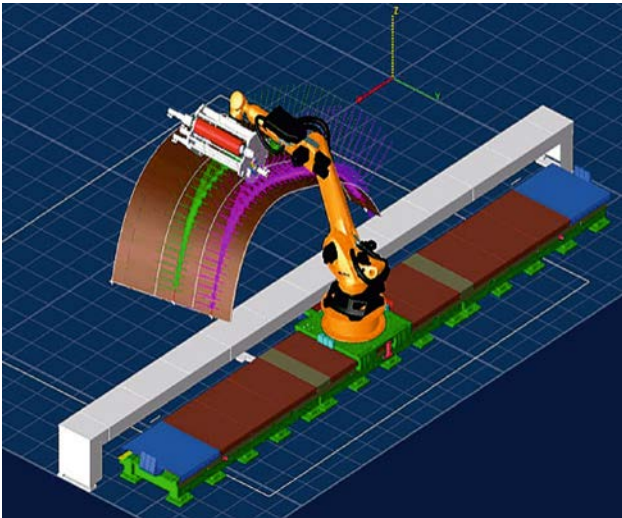


BILD 15. Erreichbarkeitsstudie mit der RoboCAD-Software.

Eine sinnvolle Validierung des Endeffektors in der Roboterzelle kann erst mit der Implementierung der Antriebe erfolgen und zwar nachdem die einzelnen Komponenten des Endeffektors mit einem positiven Ergebnis außerhalb der Zelle getestet wurden. Die geplanten Tests beinhalten die Untersuchung der Ablegegenauigkeit und –qualität, der auftretenden Kräfte und der Handhabung. Die Feststellung nötiger Konstruktionsänderungen und Abschätzung des Industrialisierungspotenzials schließen die Validierung ab.

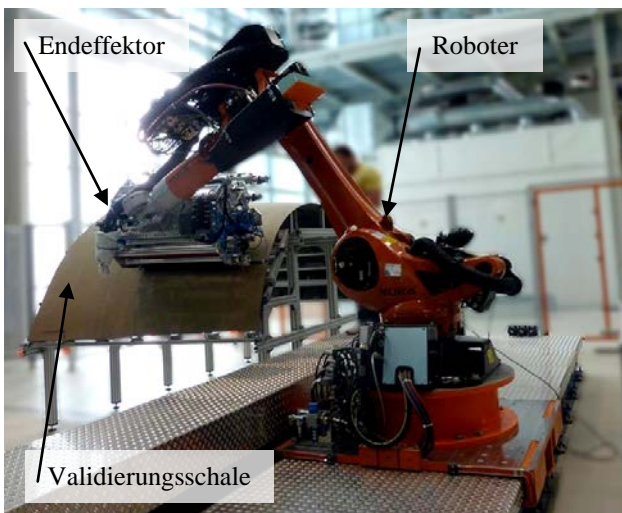


BILD 16. Endeffektor an der Thermoplatzelle mit Validierungsschale auf Gerüst

5. ZUSAMMENFASSUNG

Wir haben den Fertigungsprozess des Legens eines Blitzschutzprepregs untersucht und im Hinblick auf die Automatisierung analysiert. Anschließend wurden die Konzepte für einen Roboterendeffektor ausgearbeitet und die Prozessparameter anhand von einfachen Experimenten abgeschätzt. Anhand dieser Daten wurde

ein Versuchsablegewagen konstruiert mit dem die Konzepte validiert und die ersten Ablegeversuche durchgeführt wurden. Die Ergebnisse sind in die Konstruktion eines Roboterendeffektors eingeflossen. Dieser wurde mit Sensoren zur Prozessüberwachung ausgerüstet, die in ein Bussystem eingebunden wurden. Ein Steuerungs- und Validierungskonzept wurde ausgearbeitet. Die Anbindung der Steuerung ist als nächster Schritt geplant, die Regelung anhand der enthaltenen Sensorik folgt unmittelbar danach. Die abschließende Validierung und die Bewertung unter technologischen und wirtschaftlichen Aspekten schließen das Projekt ab.

6. DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei den Mitarbeitern und Projektpartnern bedanken, die die Entwicklung des Endeffektors vorangetrieben oder begleitet haben: F. Krebs, M. Echle, M. Schnizer, F. Weyrauch sowie der Firma Emil Bucher GmbH & Co. KG.

Die Projekte AZUR und RoCk wurden gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie laut einem Beschluss des Deutschen Bundestages.

7. QUELLEN

- [1] GERNGROSS, T.: Projekt AZUR Abschlussbericht / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2012 – Forschungsbericht DLR-IB435-2012/17, Veröffentlicht über Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)
- [2] DUDENHAUSEN, W. ; SCHMIDT, T; GERNGROSS, T. ; VOGGENREITER, H.: Projektantrag RoCk-ZLP / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2011. DLR-Interner Bericht DLR-IB 435–2011/75 (nicht veröffentlicht)
- [3] WEYRAUCH, F.: Projekt AZUR 4. Halbjahresbericht - Januar 2011 / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2011. DLR-Interner Bericht DLR-IB 435-2010/53 (nicht veröffentlicht)
- [4] WEYRAUCH, F. ; ECHLE, M. ; GERNGROSS, T ; KAPS, R. ; SCHWINN, D. ; TOSO, Y.: Projekt AZUR Halbjahresbericht - August 2010 / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2010. DLR-Interner Bericht DLR-IB 435-2010/52 (nicht veröffentlicht)
- [5] GERNGROSS, T. ; SCHMIDT-EISENLOHR, C.: Projekt AZUR 5. Halbjahresbericht - August 2011 / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2011. DLR-Interner Bericht DLR-IB 435-2010/72 (nicht veröffentlicht)
- [6] GERNGROSS, T. ; SCHMIDT-EISENLOHR, C.: Projekt AZUR 6. Halbjahresbericht - Februar 2012 / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2012. DLR-Interner Bericht DLR-IB435-2013/29 (nicht veröffentlicht)
- [7] GERNGROSS, T. ; SCHMIDT-EISENLOHR, C. ; KREBS, F.: Projekt RoCk 1. Halbjahresbericht - August 2012 / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2012. DLR-Interner Bericht DLR-IB435-2012/73, (nicht veröffentlicht)
- [8] KAUFMANN, P.: *Design and implementation of a control architecture for a robot-driven tool to apply lightning strike protection on an aircraft fuselage*, University of Ulster, School of Engineering. Master Thesis. 2013. (nicht veröffentlicht)
- [9] MALECHA, M. ; SCHMIDT-EISENLOHR, C ; KREBS, F. ; KAPS, R.: Projekt RoCk 2. Halbjahresbericht - Februar 2013 / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2013. DLR-Interner Bericht DLR-IB435-2013/30 (nicht veröffentlicht)

- [10] MIEHLING R.: Bericht zur Positionierung einer Flugzeugaußenhaut hinter einer Lineareinheit / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2012. (nicht veröffentlicht)
- [11] MALECHA, M. ; SCHMIDT-EISENLOHR, F ; KREBS, F. ; KAPS, R ; KAUFMANN, P.: Projekt RoCk Halbjahresbericht - August 2013 / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2013. DLR-Interner Bericht DLR-IB435-2013/31 (nicht veröffentlicht)